

УДК 622.834:622.862.3

doi:10.20998/2413-4295.2019.01.06

ИССЛЕДОВАНИЕ НА МОДЕЛЯХ УСТОЙЧИВОСТИ БОКОВЫХ ПОРОД ПРИ  
ВНЕЗАПНЫХ ОБРУШЕНИЯХ РАССЛОИВШЕЙСЯ ТОЛЩИС. В. ПОДКОПАЕВ<sup>1</sup>, И. В. ИОРДАНОВ<sup>1</sup>, Ю. И. СИМОНОВА<sup>1</sup>, А. В. ПОЛОЖИЙ<sup>1</sup>,  
А. В. КОРОЛЬ<sup>2</sup>, Г. Э. БОЙЧЕНКО<sup>3</sup><sup>1</sup>Государственное высшее учебное заведение «Донецкий национальный технический университет», г. Покровск, Донецкая обл., УКРАИНА<sup>2</sup>ПСП «Шахтоуправление «Добропольское» ООО «ДТЭК Добропольеуголь»», г. Доброполье, УКРАИНА<sup>3</sup>ООО «Шахта «Свято-Покровская №3», УКРАИНА

\*e-mail: yuliia.simonova@donntu.edu.ua

**АННОТАЦИЯ** Целью работы является определение условий устойчивости боковых пород в угленосном массиве вмещающем выработку, при поддержании кровли угольного пласта податливой опорой. Для достижения поставленной цели были выполнены исследования с привлечением основных положений классической механики, теории упругости и колебаний, а также лабораторные исследования на моделях из эквивалентных материалов, когда кровля угольного пласта была представлена в виде балки с податливой опорой. В результате обработки экспериментальных моделей, учитывались геометрические параметры, отражающие в определенные моменты времени, величину возможного отклонения центра масс балки от положения равновесия  $a$ , (м) при ударе и мгновенного сжатия податливой опоры  $\Delta X$ , (м). Доказано, что после силового воздействия падающей породы на балку, при определенной жесткости податливой опоры, с учетом продолжительности удара  $t_{y0}$ , (с) и промежутка времени, в течение которого перемещение балки достигает максимальных значений  $\Delta t$ , (с), т.е. когда  $t_{y0} = \Delta t$ , (с) и  $a \approx \Delta X$ , (м), моделируемая система теряет свою устойчивость. При таком взаимодействии балки с податливой опорой, по мере увеличения жесткости охранного сооружения, когда  $a$ , (м) и  $\Delta X$ , (м), принимают минимальные значения, вероятность разрушения боковых пород и их обрушение в выработку, увеличивается. Выполненный комплекс исследований показывает, что при внезапных обрушениях расслоившейся породной толщи, для снижения уровня травматизма горнорабочих и повышения устойчивости кровли угольного пласта в рабочей части лавы и позади очистного забоя, целесообразно применение податливых опор из дробленой породы, обоснованного гранулометрического состава.

**Ключевые слова:** горное давление; обрушения; изгибные колебания; динамические нагрузки; податливая опора; закладка выработанного пространства

STUDY ON MODELS OF STABILITY OF SIDE SPECIES AT EXTREME DAMAGE  
OF A DIVIDED THICKNESSS. PODKOPAEV<sup>1</sup>, I. YORDANOV<sup>1</sup>, Y. SIMONOVA<sup>1</sup>, A. POLOZHIY<sup>1</sup>, A. KOROL<sup>2</sup>,  
H. BOICHENKO<sup>3</sup><sup>1</sup>Public higher education institution «Donetsk National Technical University», Pokrovsk, Donetsk region, UKRAINE<sup>2</sup>PSP "Dobropolskoye Mine Administration" DTEK Dobropolyeugol LLC ", Dobropolye, UKRAINE<sup>3</sup>LLC Mine Syvato-Pokrovskaya No. 3 Mine, UKRAINE

**ABSTRACT** The aim of the work is to determine the stability conditions of the lateral rocks in the coal-bearing massif of the host excavation, while maintaining the roof of the coal seam with a supple support. To achieve this goal, research was carried out using the basic principles of classical mechanics, the theory of elasticity and vibrations, as well as laboratory studies on models from equivalent materials, when the roof of the coal seam was presented in the form of a beam with a flexible support. As a result of testing the experimental models, geometric parameters were taken into account, reflecting at certain points in time, the magnitude of the possible deviation of the center of mass of the beam from the equilibrium position  $a$ , (m) upon impact and instantaneous compression of the compliant support  $\Delta X$ , (m). It is proved that after the force of a falling rock on a beam, with a certain rigidity of the pliable support, taking into account the duration of the impact  $t_{sp}$ , (s) and the period of time during which the beam moves to maximum values  $\Delta t$ , (s), i.e. when  $t_{sp} = \Delta t$ , (s) and  $a \approx \Delta X$ , (m), the simulated system loses its stability. In this interaction, the beam with a malleable support, as the rigidity of the security structure increases, when  $a$ , (m) and  $\Delta X$ , (m) take on minimal values, the probability of destruction of lateral rocks and their collapse into production, increases. A complex of studies shows that in case of sudden collapses of stratified rock strata, to reduce the level of injuries to miners and increase the stability of the coal seam roof in the working part of the lava and behind the stope, it is advisable to use malleable crushed rock supports with reasonable particle size distribution.

**Keywords:** rockpressure; crushing; bending vibrations; load response; foil bearing; goaf stowing

## Введение

Внезапность обрушений расслоившейся породной толщи, приводящих к завалам горных выработок, является одной из особенностей

разработки угольных пластов в сложных горно-геологических условиях. Аварии, произошедшие при обрушениях боковых пород в угольных шахтах, как правило, сопровождаются крупным материальным ущербом и невосполнимой утратой человеческой

жизни. Изучение природы обрушений, их влияние на состояние боковых пород и, на основе этого, разработка эффективных мероприятий, направленных на сохранение выработок в эксплуатационном состоянии, будет способствовать созданию безопасных условий труда горнорабочих в глубоких шахтах.

Традиционно считается, что проявления горного давления в выработках, зависят от совокупного влияния многих горно-геологических факторов, к которым первостепенно следует относить напряженное состояние осадочных горных пород и их физико-механические свойства. Наряду с этим, изучение особенностей проявления горного давления в выработках на большой глубине позволило установить, что характер его опасных проявлений, определяется не только напряженным состоянием массива осадочных горных пород и их физико-механическими свойствами, но и спецификой формирования последнего, обусловившей неупругое деформирование при объемном сжатии, а также способность деформироваться и разрушаться при разгрузке [1].

Опыт работы шахт Донбасса, разрабатывающих угольные пласты крутонаклонного и крутого залегания показывает, что при традиционных способах управления горным давлением полным обрушением или удержанием кровли на кострах, применяемая в очистном забое крепь, не способна противостоять сдвигению расслоившихся боковых пород в окрестности поддерживаемых горных выработок. Применяемые в настоящее время способы охраны штреков различными конструкциями из дерева (кусты из стоек, органый ряд) или целиками угля, не всегда обеспечивают надежную защиту выработок от опасных проявлений горного давления, в т. ч. при внезапных обрушениях расслоившейся породной толщи.

Исследованиями ДонУГИ и ДонНТУ было установлено, что закладочный массив предотвращает развитие сдвижений боковых пород в окрестности горных выработок и создает зоны устойчивых пород позади очистного забоя [2-4], а значит, существенно изменить геомеханическую обстановку в углепородном массиве, вмещающем выработки, можно за счет применения закладки выработанного пространства, что позволит обеспечить устойчивость пород кровли разрабатываемого угольного пласта позади очистного забоя и будет способствовать повышению безопасности труда горнорабочих в подземных условиях.

### Постановка задачи

Целью работы является определение условий устойчивости боковых пород в углепородном массиве, вмещающем выработки, при поддержании кровли угольного пласта податливой опорой, при действии динамических нагрузок.

Для достижения поставленной цели были выполнены аналитические исследования с применением основных положений классической механики, теории упругости и колебаний, а так же лабораторные исследования на моделях из эквивалентных материалов, в которых породы кровли угольного пласта рассматривали в виде балки с податливой опорой из дробленой породы, различного гранулометрического состава.

В результате отработки экспериментальных моделей, после силового воздействия падающей породы на балку, учитывались геометрические параметры, отражающие в определенные моменты времени, величину перемещения балки и мгновенного сжатия податливой опоры, на которую опирается балка.

### Материалы и результаты исследований

В реальных условиях разработки угольных пластов, при различных способах управления кровлей в лаве и охраны штреков, сохранность горных выработок обеспечивается за счет устойчивости пород непосредственной кровли угольного пласта, как основного грузонесущего элемента подземного сооружения.

Согласно гипотезе балок [5], можно предположить, что в очистном забое, кровля угольного пласта деформируется и разрушается подобно балкам. Исходя из этого, рассмотрим кровлю угольного пласта, как двухопорную балку АС длиной  $L$ , (м), на которую падает груз массой  $m$ , (кг). Балка имеет в т.А, неподвижную шарнирную опору, а в т.В- подвижную шарнирную опору, расстояние между которыми  $2l$ , (м). К консольному концу С балки, длиной  $l$ , (м), приложена сосредоточенная вертикальная сила  $P$ , (Н) (рис.1).

Известно [6-8], что любая динамическая нагрузка, вынуждает деформируемую систему перемещаться, а значит, задача исследования устойчивости изучаемого объекта, состоит в определении усилий и перемещений, порождаемых инерционными силами и статической компонентой внешнего воздействия, когда система совершает движение, т.е. изгибается.

После силового воздействия падающей породы на балку, в моделируемой системе проявляются две активные силы: одна от силы тяжести балки  $Q$ , (Н), приложенная в середине и, вторая, сосредоточенная сила  $P$ , (Н), приложенная в конце балки.

На рис.1 видно, что в опоре В реакция направлена навстречу силы  $P$ , (Н). В опоре А, балка, под действием силы  $P$ , (Н), стремится повернуться вокруг опоры В. Однако, опора А препятствует этому, а значит, реакция опоры А, направлена вниз.

Проверку правильности определения реакций, согласно [9], осуществим по выражению, когда

$$\sum P_y = -R_A + R_B - P = -\frac{1}{2}P + \frac{3}{2}P - P = 0. \quad (1)$$

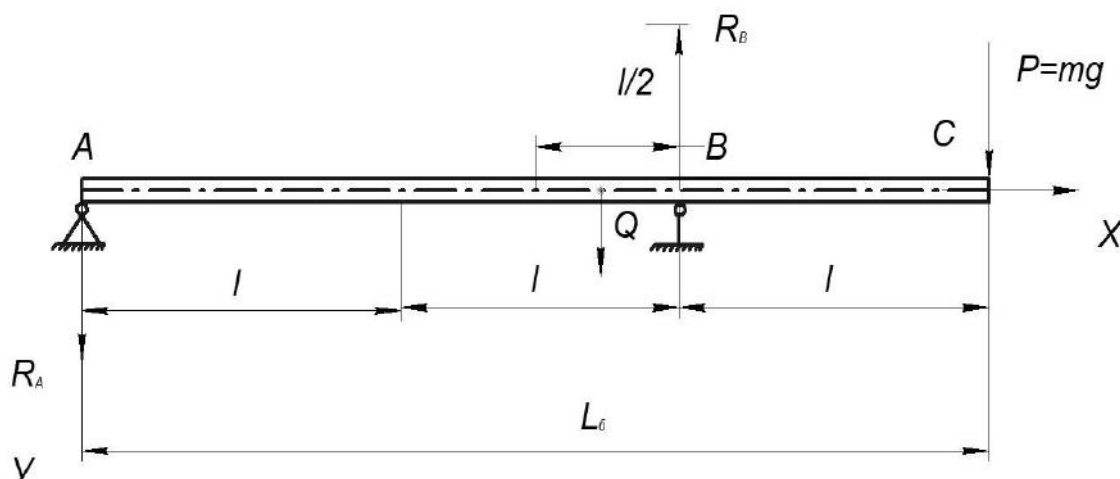


Рис.1 – Схема к определению параметров устойчивости кровли угольного пласта, представленных в виде балки:  $Q$ - вес балки, (Н);  $P$ - сила, действующая на консольный конец балки, (Н);  $A, B$ - опоры балки,  $R_A, R_B$ - соответственно, реакция опоры  $A$  и  $B$ ;  $L_0=3l$ - длина балки, (м),  $m$ -масса падающего груза, (кг)

При динамическом поведении такой системы, когда на балку падает груз определенной массы  $m$ , (кг), может произойти разрушение балки. Определим максимальное значение массы падающего груза на балку, при которой происходит потеря устойчивости моделируемой системы.

Рассмотрим сумму моментов сил, относительно опоры  $B$  и приравняем ее нулю, т.е.

$$\sum m_B(P) = Q \cdot 1 - P \cdot 2 = 0, \quad (2)$$

откуда

$$P = \frac{Q}{2}. \quad (3)$$

Из выражения (3) следует, что при  $P > \frac{Q}{2}$ , происходит потеря устойчивости моделируемой системы и балка разрушается.

Считаем, что падающий на балку груз, известной массы  $m$ , (кг), имеет скорость  $V$ , (м/с). Определим минимальную массу балки  $m_0$ , (кг), при которой скорость груза  $U$ , (м/с) после удара, будет равна нулю.

Обозначим через  $V_0$ , (м/с) скорость балки до удара, а через  $U_0$ , (м/с)- после удара и, используя гипотезу Ньютона [9,10], определим значение коэффициента восстановления при ударе из следующего соотношения

$$k = \frac{U_0 - V}{V - V_0} = \frac{U_0 - 0}{V - 0} = \frac{U_0}{V}, \quad (4)$$

откуда

$$U_0 = kV, \quad (5)$$

где  $V = \sqrt{2gH}$ ;  $H$ - высота падения груза, м.

Для решаемой задачи, закон сохранения количества движения [9], принимает вид

$$mV + m_0V_0 = mU + m_0U_0. \quad (6)$$

Учитывая то, что  $V_0 = 0$  и  $U=0$ , имеем

$$mV = m_0kV \quad (7)$$

Следовательно, когда выполняется соотношение

$$m_0 \geq \frac{mV}{kV} = \frac{m}{k}, \quad (8)$$

скорость падающего груза после удара по балке, будет равна нулю.

Для смягчения действия динамических нагрузок и ограничения величины перемещений изучаемого объекта, при силовом воздействии падающей породы на балку, для обеспечения устойчивого состояния моделируемой системы, рекомендуются применение податливых опор [6,7,9,11,12].

Определим величину ударной силы  $P_{уд}$ , (Н), при падении груза массой  $m$ , (кг) на балку, с различной высоты  $H$ , (м), но с учетом того, что балка имеет различные опорные связи. Так, согласно второго закона Ньютона [7,9]

$$m\bar{d}V = \bar{P}dt. \quad (9)$$

С использованием теоремы о среднем [9], считаем что величина ударной силы определяется как

$$P_{уд} = \frac{mV}{t_{уд}}. \quad (10)$$

где  $t_{уд}$ - продолжительность удара, с.

Для надежной работы моделируемой деформируемой системы необходимо, чтобы все ее элементы были устойчивы. В рассматриваемых условиях, при изучении устойчивости пород кровли, когда проявляется действие динамических нагрузок, величину критических напряжений, можно определить

исходя из формулы Эйлера [6,7]. Однако ее применение имеет ряд ограничений, которые должны учитывать момент потери устойчивости балки.

Пределы применимости формулы Эйлера, можно установить исходя из понятия предельной гибкости балки  $\lambda_{пр}$ , величина которой зависит от ее физико-механических свойств, т.е.

$$\lambda_{пр} = \pi \sqrt{\frac{E}{[\sigma_{изг}]}} \quad (11)$$

где  $E$ - модуль упругости балки, Н/м<sup>2</sup>;  $[\sigma_{изг}]$ -предел прочности балки на изгиб, Н/м<sup>2</sup>.

С учетом выражения (11), формула Эйлера дает истинное значение нагрузки, при которой происходит потеря устойчивости балки, когда выполняется соотношение

$$\sigma_{max} > \frac{\pi^2 E}{\lambda^2} \quad (12)$$

где  $\sigma_{max}$ - максимальные напряжения, возникающие в исследуемом сечении балки при действии внешней силы, Н/м<sup>2</sup>.

С учетом выражений (11) и (12), разрушение балки будет происходить в результате изгиба.

В результате силового воздействия падающей породы на балку, уравнение движения балки, с учетом рекомендаций [13,14], в моделируемой системе, можно представить в виде

$$x = a \sin(kt + \varphi) + \frac{mg}{c} \quad (13)$$

где  $\frac{mg}{c}$ - величина статического сжатия податливой опоры, м;  $c$  - жесткость податливой опоры, Н/м.

Очевидно то, что максимальное перемещение балки будет при  $\Delta X$ , (м), т.е. когда выполняется условие

$$\sin(kt + \varphi) = 1, \quad (14)$$

а

$$(kt + \varphi) = \frac{\pi}{2} \quad (15)$$

В этом случае, время  $\Delta t$ , (с), в течение которого перемещение балки достигает максимальных значений, определяется по выражению

$$\Delta t = \frac{1}{k} \left( \frac{\pi}{2} - \varphi \right), \quad (16)$$

где

$$k = \sqrt{\frac{c}{m+m_6}} \quad (17)$$

Продолжительность удара  $t_{уд}$ , (с), можно определить, как в [10], по выражению

$$t_{уд} = \frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{x}{g}} \quad (18)$$

В результате удара груза по балке, которая опирается на податливую опору, происходит сжатие опоры. При падении груза известной массы, максимальная величина мгновенного сжатия опоры, равна сумме ее статического сжатия  $\frac{mg}{c}$ , (м) и амплитуды гармонических колебаний  $a$ , (м), т.е.

$$\Delta X = \frac{mg}{c} + a. \quad (19)$$

В данном случае, параметр  $a$ , представляет собой возможное максимальное отклонение центра масс балки в моделируемой деформируемой системе от положения равновесия.

Известно [7,9], что когда  $t=0$ ,

$$x_0 = -\frac{mg}{c}, \quad (20)$$

а

$$\dot{x} = \frac{m}{m+m_6} \sqrt{2gH} \quad (21)$$

где  $m_6$ -масса балки, кг.

Учитывая то, что

$$a \sin \alpha = -\frac{mg}{c}, \quad (22)$$

а

$$ak \cos \alpha = \sqrt{2gH} \frac{m}{m+m_6}, \quad (23)$$

после соответствующих математических преобразований, получим

$$a = \sqrt{\frac{m^2 g^2}{c^2} + 2gH \frac{m^2}{c(m+m_6)}} \quad (24)$$

Тогда, с учетом вышеизложенного, максимальная величина мгновенного сжатия податливой опоры  $\Delta X$ , (м), после падения породного блока массой  $m$ , (кг) на балку, определяется как

$$\Delta X = \frac{mg}{c} + \sqrt{\frac{m^2 g^2}{c^2} + 2gH \frac{m^2}{c(m+m_6)}} \quad (25)$$

В теории колебаний, при анализе собственных колебаний изучаемого объекта, часто применяют спектральные методы, сущность которых заключается в замене исследуемых физических величин, таких как внешняя сила и жесткость, их спектрами. Знание динамической жесткости податливого основания, позволяет определить плотность амплитудного спектра движений, возникающих в деформируемой системе после удара. Однако от времени удара, зависит не плотность амплитудного спектра, а фазовый спектр [13,15-17].

При исследовании фазовых соотношений, между действием внешней силы и откликом податливого основания, в моделируемой системе – податливой опоры, ранее было установлено, что отклик последней, всегда отстает от воздействия

[13,17]. Поэтому, в случае воздействия на балку внешней силы, при исследовании затухающих колебаний балки в моделируемой системе, когда одновременно совершаются одинаковые движения, сравниваемые спектры должны отличаться друг от друга только сдвигом.

Согласно [18,19], между существующими характеристиками, описывающими движение рассматриваемой деформируемой системы, существует взаимосвязь, которая позволяет определить величину сдвига фазы  $\varphi$ , тангенс которой  $\operatorname{tg} \varphi$  определяется по выражению

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{x \cdot k}{V}. \quad (26)$$

Однако, с учетом того, что жесткость податливой опоры может изменяться, сдвиг фазы во времени  $\operatorname{tg} \varphi$ , предлагается определять как

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{mg}{c} \cdot \frac{k}{V}. \quad (27)$$

Для того, чтобы оценить влияние податливой опоры на величину деформаций изгиба пород кровли угольного пласта, при действии динамических нагрузок, были выполнены исследования на моделях

из эквивалентных материалов. Эксперименты были выполнены на специальном стенде, в лаборатории горного давления ДонНТУ, когда породы кровли угольного пласта были представлены в виде породной балки длиной  $L_0=0,6$  м, толщиной  $h=0,02$  м и шириной  $B=0,04$  м. Масса балки соответствовала  $m_0=1,4$  кг, модуль упругости  $E=8800$  МПа, плотность  $\rho=2100$  кг/м<sup>3</sup>. Балка была изготовлена из песчано-цементной смеси, согласно рекомендаций [20-22] и нагружалась внешней силой  $P$ , (Н). С одной стороны балка имела жесткое закрепление в т. А, на расстоянии  $AB=2l$  балка опиралась на податливую опору из дробленой породы, имела различную насыпную плотность  $\rho_{н.п.}$ , (кг/м<sup>3</sup>) и пустотность  $M$ , (%), в зависимости от вариантов моделирования (рис.2). Гранулометрический состав дробленой породы, насыпная плотность и пустотность податливой опоры, были определены, в лабораторных условиях, в соответствии с [23].

Данные лабораторных исследований, по определению гранулометрического состава дробленой породы, насыпной плотности  $\rho_{н.п.}$ , (кг/м<sup>3</sup>) и пустотности  $M$ , (%) податливой опоры, по вариантам моделирования, представлены в табл.1. Масштаб моделирования соответствовал 1:100. Фото стенда, на котором проводились эксперименты, представлено на рис.2 а,б,в.

Таблица 1 - Гранулометрический состав дробленой породы, насыпная плотность и пустотность податливой опоры

Варианты моделирования	Размеры частиц, мм						Насыпная плотность $\rho_{н.п.}$ , (кг/м <sup>3</sup> )	Пустотность, $M$ , %
	>4.0	4,0	3.0	2.0	1.0	<1.0		
№1		-	-	-	-	100%	1980	6
№2			50%	50%	-	-	1870	13
№3	-	100%	-	-	-	-	1670	20
№4	100%	-	-	-	-	-	1640	22

Количество измерений, которые необходимо выполнить, для получения надежных и достоверных результатов моделирования, определялось согласно рекомендаций [23,24] и соответствовало 10, а значит, при проведении экспериментов, было отработано по 10 моделей для каждого варианта.

При испытании моделей перемещения и деформации балки, регистрировались цифровой фотокамерой типа Canon. По фотографическим изображениям, с помощью пиксельных координат точек, с использованием основных принципов фотограмметрии [25], определялось положение моделируемой балки в пространстве, до и после действия на нее внешней силы.

Для определения величины прогиба балки  $X$ , (м), породный блок массой  $m=0,2$  кг с высоты  $H=0,3$  м

сбрасывали на балку в т. С. Рассматривали неупругий удар. Результаты экспериментов, по вариантам моделирования, представлены в табл.2.

На рис.3 приведены графики изменений величины прогиба балки  $X$ , (м) от жесткости податливой опоры  $C_p$ , (кН/м), с учетом ее насыпной плотности  $\rho_{н.п.}$ , (кг/м<sup>3</sup>) и пустотности  $M$ , (%).

Из приведенных зависимостей видно, что с увеличением жесткости податливой опоры  $C_p$ , (кН/м), насыпная плотность  $\rho_{н.п.}$ , (кг/м<sup>3</sup>) увеличивается, а пустотности  $M$ , (%), наоборот, уменьшается (рис.4).

При падении породного блока массой  $m=0,2$  кг, с высоты  $H=0,3$  м, прогиб балки  $X$ , (м) уменьшается, когда происходит увеличение жесткости податливой опоры  $C_p$ , (кН/м).

Таблица 2 - Экспериментальные значения величины прогиба балки  $X$ , (м) и жесткости податливой опоры  $C_n$ , (кН/м)

Показатели	Варианты моделирования			
	1	2	3	4
Величина прогиба $X$ , (м)	0.0009	0.0026	0.0054	0.007
Жесткость податливой опоры $C_n$ , (кН/м)	17.0	6.0	2.9	2.2

Установлено, что максимальный прогиб баки, равный  $X=0.007$  м отмечен при минимальной жесткости податливой опоры  $C=2.2$  кН/м, при ее пустотности  $M=22\%$  (рис.3). В этом случае, после силового воздействия падающей породы, балка разрушилась (рис.2а). Минимальный прогиб балки, равный  $X=0.0009$  м, зафиксирован в случае, когда жесткость податливой опоры равна  $C_n=17,0$  кН/м (рис.3). Пустотность опоры, в этом варианте моделирования, составляла  $M=6\%$ . При падении породного блока известной массы, балка разрушилась (рис.2б).

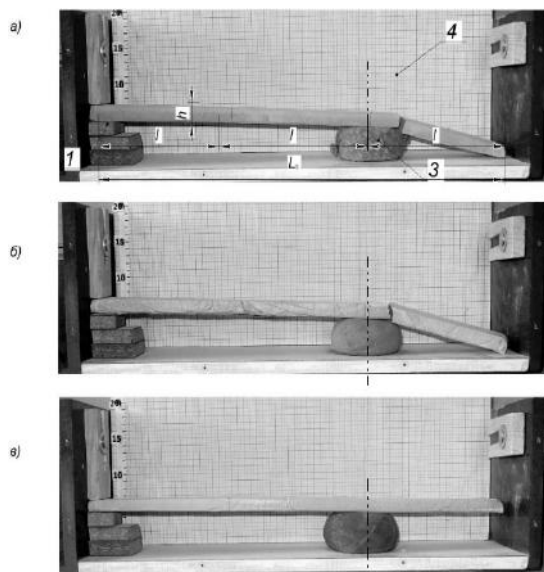


Рис.2 – Фото стенда для изучения устойчивости пород кровли угольного пласта с податливой опорой различной жесткости  $C_n$ , (кН/м), при действии динамических нагрузок: 1- жесткая опора; 2- балка-непосредственная кровля; 3- податливая опора из дробленой породы; 4- стенд с координатной сеткой:  $L_6$ - длина балки, (м);  $h$ -толщина балки, (м);  $L_6=0.6$  м;  $h=0.2$  м; а) насыпная плотность податливой опоры  $\rho_{н.п.}=1640$  кг/м<sup>3</sup>; б) насыпная плотность податливой опоры  $\rho_{н.п.}=1980$  кг/м<sup>3</sup>; в) насыпная плотность податливой опоры  $\rho_{н.п.}=1870$  кг/м<sup>3</sup>

Следует отметить, что в случае, когда пустотность податливой опоры равна  $M=13\%$ ,

смещения балки составили  $X=0.0026$  м, при жесткости податливой опоры  $C=6.0$  кН/м (рис.4). В таких условиях, при действии динамических нагрузок на балку, обеспечивается устойчивость моделируемой системы и целостность балки (рис.3,в).

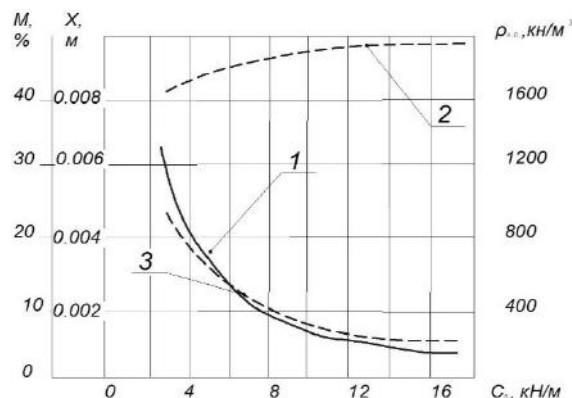


Рис.3 – Графики изменений величины прогиба балки  $X$ , (м) от жесткости податливой опоры  $C_n$ , (кН/м), с учетом насыпной плотности  $\rho_{н.п.}$ , (кг/м<sup>3</sup>) и пустотности  $M$ , (%): 1-  $X$ , (м); 2-  $\rho_{н.п.}$  (кг/м<sup>3</sup>); 3-  $M$ , (%)

Экспериментально обосновано, что разрушение балки в моделируемой системе, а, следовательно, обрушение пород кровли, при действии динамических нагрузок, происходит в условиях, когда пустотность податливой опоры, предназначенной для поддержания пород кровли угольного пласта позади очистного забоя, находится в интервале  $M>20\%$  или  $M\leq 6\%$ , при увеличении ее насыпной плотности.

На рис.4 представлены графики изменений величины максимального сжатия податливой опоры  $\Delta X$ , (м), после падения породного блока на балку и возможного отклонения балки от положения равновесия  $a$ , (м), от изменения жесткости податливой опоры  $C_n$ , (кН/м).

Из полученных зависимостей видно, что с учетом изменения жесткости податливой опоры, величина ее максимального сжатия  $\Delta X$ , (м) изменяется и, при  $C_n=17.4$  кН/м принимает минимальное значение, равное  $\Delta X=0.003$  м. Затем, по мере уменьшения жесткости опоры до величины равной  $C_n=3.0$  кН/м, значение  $\Delta X$ , (м) увеличивается до  $\Delta X=0.0076$  м, т.е.

2.5 раза (рис.4). При этом, величина возможного отклонения балки от положения равновесия  $a$ , (м), уменьшается в 2,2 раза, соответственно, с  $a=0.003$  м до  $a=0.0069$  м. (рис.4).

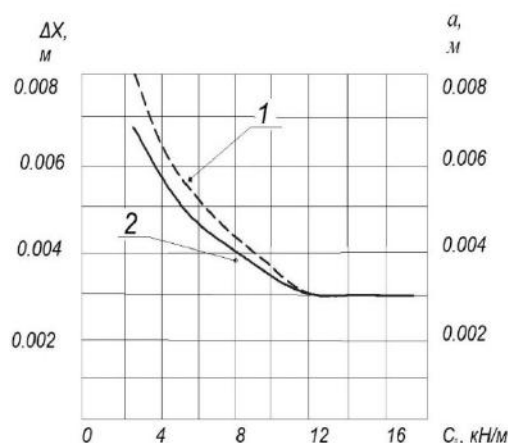


Рис. 4 – Графики изменений величины максимального сжатия податливой опоры  $\Delta X$ , (м), на которую опирается балка и возможного отклонения балки от положения равновесия  $a$ , (м) от изменения жесткости податливой опоры  $C_p$ , (кН/м): 1- $\Delta X$ , (м); 2- $a$ , (м)

Экспериментально установлено, то при жесткости податливой опоры  $C_p \geq 10.2$  кН/м, когда величина ее максимального сжатия  $\Delta X$ , (м), равна величине возможного отклонения балки от положения равновесия  $a$ , (м), т.е. когда  $a \approx \Delta X$ , (м), при действии динамической нагрузки на балку, происходит ее разрушение (рис.2.б). В случае, когда  $C_p < 10.2$  кН/м и  $a < \Delta X$ , (м), моделируемая система находится в устойчивом состоянии, целостность балки сохраняется (рис.2 в).

На рис. 5 представлены графики изменений продолжительности удара  $t_{уд}$ , (с) и промежутка времени, в течение которого перемещение балки достигает максимальных значений  $\Delta t$ , (с) от изменения жесткости  $C_p$ , (кН/м) податливой опоры.

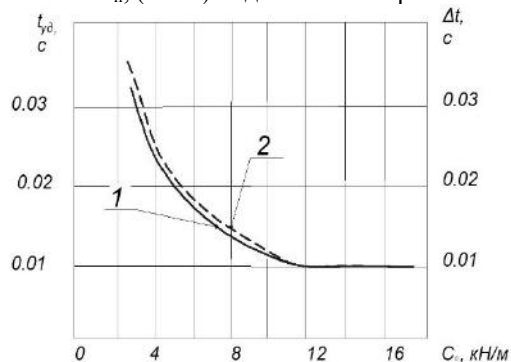


Рис. 5 – Графики изменений продолжительности удара  $t_{уд}$ , (с) и промежутка времени  $\Delta t$ , (с) от жесткости податливой опоры  $C_p$ , (кН/м): 1-  $t_{уд}$ , (с); 2- $\Delta t$ , (с)

Из представленных зависимостей видно, что с увеличением жесткости податливой опоры  $C$ , (кН/м), продолжительность удара  $t_{уд}$ , (с) и промежуток времени  $\Delta t$ , (с), уменьшаются (рис.5). Установлено, что при жесткости податливой опоры  $C=2.9$  кН/м, продолжительность удара равна  $t_{уд}=0.032$  с, а  $\Delta t=0.035$  с. Разница между этими величинами составляет  $0.003$  с (рис.5). При жесткости податливой опоры  $C=6.0$  кН/м, когда  $t_{уд}=0.017$  с, а  $\Delta t=0.018$  с, разница составляет  $0.001$  с (рис.6). В этих случаях при действии динамической нагрузки на балку, ее целостность сохраняется. В случае, когда  $C=17.0$  кН/м, при продолжительности удара  $t_{уд}=0.001$  с и  $\Delta t=0.001$  с, (рис.5), т.е. когда  $t_{уд}=\Delta t$ , моделируемая система теряет свою устойчивость и балка разрушается.

На рис.6 представлен график изменения величины сдвига фазы во времени  $\text{tg}\varphi$  от жесткости податливой опоры  $C_p$ , (кН/м).

Из полученной зависимости видно, что с увеличением жесткости податливой опоры  $C$ , (кН/м), величина сдвига фазы во времени  $\text{tg}\varphi$ , уменьшается. Причем, разница в определении  $\text{tg}\varphi$  при минимальном значениями жесткости опоры  $C=2.9$  кН/м и ее максимальным значением  $C=17.0$  кН/м, составляет 70% (рис.6).

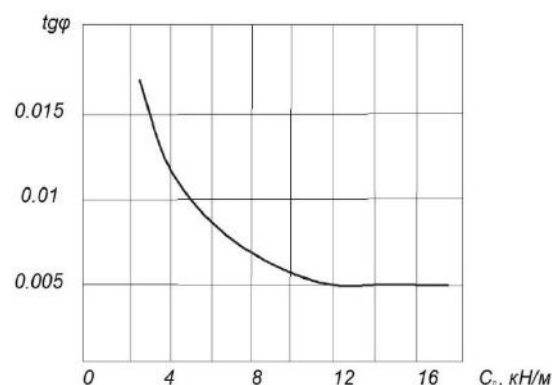


Рис. 6 – Графики изменений величины сдвига фазы  $\text{tg}\varphi$  во времени от жесткости податливой опоры  $C_p$ , (кН/м)

На рис. 7, представлены графики, отражающие изменение величины ударной силы  $P_{уд}$ , (Н), при падении груза массой  $m$ , (кг) на балку, длиной  $L$ , (м), с жесткой или податливой опорой.

Установлено, что с увеличением высоты падения груза на балку, величина ударной силы  $P_{уд}$ , (Н) уменьшается в 2,8 раза, при наличии в рассматриваемой деформируемой системе податливой опоры, в сравнении с вариантом, в котором моделируемая балка имеет жесткие опорные связи (рис. 7).

Таким образом, в результате выполненного комплекса исследований определения условий устойчивости боковых пород, с использованием податливых охранных сооружений-опор, расположенных позади очистного забоя, отмечено, что при действии динамических нагрузок на кровлю

угольного пласта, действующая критическая нагрузка, подобна разрушающей, при расчете балки на изгиб. Обоснованно, что условиями устойчивости кровли, являются геометрические параметры, отражающие перемещение балки и величину мгновенного сжатия податливой опоры при ударе.

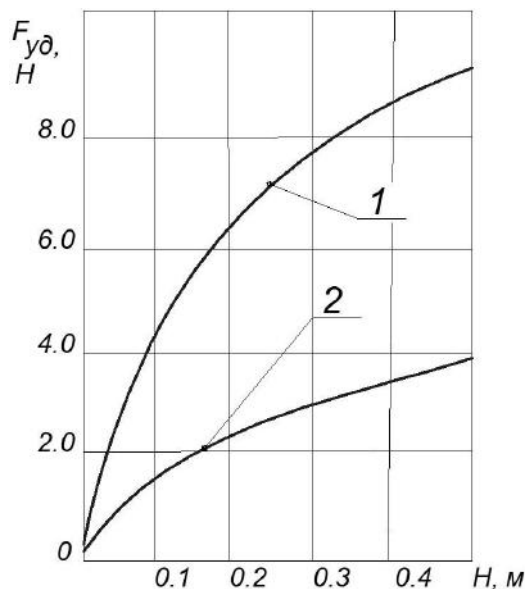


Рис. 7 – Графики изменений величины ударной силы  $P_{уд}(H)$ , при падении груза массой  $m$ , (кг) на балку длиной  $L$ , (м), имеющей различные опорные связи, от высоты падения  $H$ , (м): 1- с жесткими опорными связями; 2- с податливой опорой;  $m = 0.2$  кг;  $L_0 = 0.6$  м

Доказано, что из-за неоднородности материала балки и податливой опоры, которая имеет различную гранулометрический состав, а следовательно пустотность и насыпную плотность, с учетом величины внешней силы, деформация балки будет отставать от ее перемещения во времени, на величину сдвига фазы, которая зависит от физико-механических свойств балки, ее массы и жесткости податливой опоры. Исходя из этого, деформация балки, вызванная соответствующими перемещениями, достигает своего наибольшего значения не одновременно с окончанием действия внешней силы на балку, а через некоторую величину  $t_{сф}$ .

Экспериментально установлено, что устойчивость моделируемой системы, в которой породы кровли угольного пласта считаются балкой, что опирается на податливую опору, зависит от величины сжатия податливой опоры  $\Delta X$ , (м) и возможного отклонения центра масс  $a$ , (м) этой балки от положения равновесия при ударе. Определено, что закон движения балки, после силового воздействия падающей породы, зависит от времени, когда перемещения балки достигают максимальных значений, что определяет напряженно-деформированное состояние системы и ее устойчивость.

## Вывод

Устойчивость боковых пород в окрестности поддерживаемых горных выработок, в т.ч. при внезапных обрушениях расслоившейся породной толщи, обеспечивается за счет размещения позади очистного забоя податливых охранных сооружений-опор из дробленой породы, обоснованного гранулометрического состава, что так же позволит повысить эффективность мероприятий по безопасности труда горнорабочих в глубоких угольных шахтах.

## Список литературы

1. **Николин, В. И.** Снижение травматизма от проявлений горного давления / **В. И. Николин, С. В. Подкопаев, А. В. Агафонов, Н. В. Малеев.** – Донецк: Норд-Пресс, 2005. – 332 с.
2. **Жуков, В. Е.** Малоотходная технология добычи угля / **В. Е. Жуков, В. В. Выстороп, А. М. Колчин и др.** – К.: Техника, 1984. – 144 с.
3. **Liashok, Ya.** Experimental studies of the seam openings competence in different methods of protection under pitch and steep coal seams development / **Ya. Liashok, I. Iordanov, D. Chepiga, S. Podkopaiev** // *Mining of Mineral Deposits.* – 2018. – Vol.12, 4. – P. 9-19. - doi: 10.1547//mining12.04.009.
4. **Зборщик, М. П.** Механизм повышения устойчивости кровли в лавах при применении закладки выработанного пространства / **М. П. Зборщик, С. В. Подкопаев** // *Уголь Украины.* - 1992. - №5. - С. 20-23.
5. **Шашенко, А. Н.** Геомеханика / **А. Н. Шашенко, В. П. Пустовойтенко, Е. А. Сдвижкова.** - К: Новый друк, 2016. - 528 с.
6. **Шакирзянов, Р. А.** Динамика и устойчивость сооружений / **Р. А. Шакирзянов, Ф. Р. Шакирзянов.** – Казань: Изд-во Казанс. гос. архит-стр. ун-та, 2005. - 120с.
7. **Циглер, Ф.** Механика твердых тел и жидкостей / **Ф. Циглер.** - Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая механика». - 2002. – 912 с.
8. **Baruh, H.** Applied Dynamics / **H. Baruh.** – Taylor Francis Group. LLS, 2015. – 872 p.
9. **Акимов, В. А.** Теоретическая механика. Динамика. В 2ч. Ч2. Динамика материальной точки / **В. А. Акимов и др.** / 368-3. Под общ. ред. проф. **А. В. Чигарева** – Минск: Новое знание, 2010. – 863 с.
10. **Кильчевский, Н. А.** Теория соударений твердых тел / **Н. А. Кильчевский.** - Киев: Наукова думка, 1969. – 246 с.
11. **Ginsberg, I.** Engineering Dynamics / **I. Ginsberg.** – Cambridge University Press, 2008. – 726 p. – doi: 10.1017/CBO9780511805899.
12. **Kleppner, D.** An introduction to Mechanics / **D. Kleppner, R. Kolenkow.** – Cambridge University Press, 2014. – 542 p.
13. **Стрелков, С. П.** Введение в теорию колебаний / **С. П. Стрелков.** - СПб.: Изд-во «Лань», 2005. – 440 с.
14. **Гусев, А. Ф.** Прикладная теория колебаний / **А. Ф. Гусев, М. В. Навоселова.** - Тверской госуд. ун-т, 2017. – 160 с.
15. **Ebrahimi, F.** Advances in Vibration Analysis Research. - In Tech. / **F. Ebrahimi.** – 2011. – 456 p. – doi: 10.5772/639.
16. **Bottega, W. J.** Engineering Vibrations / **W. J. Bottega.** – CRC Press, Taylor&Francis Group, 2006. – 727 p.



17. **Baddour, N.** Recent Advances in Vibration Analisic / N. Baddour. – In Tech., Rijeka, Croatia, 2011. – 236 p.
18. **Ковалева, Н. В.** Определение оптимальных параметров демпфирования в системах сейсмоизоляции / Н. В. Ковалева, Ю. Л. Рутман, Г. В. Давыдова // *Инженерно-строительный Журнал. Magazine of Civil Engineering*, №5. – 2013. – С. 107-115.
19. **Водопьянов, В. И.** Исследование демпфирующих свойств материалов / В. И. Водопьянов, А. А. Белов. – Волгоград, ВолгГТУ, 2001. – 12 с.
20. Національний стандарт України. Методи випробування цементу. Частина 1. Визначення міцності (EN 196-1:2005, IDT) ДСТУ EN196-1:2007. Київ, Мінбуд України, 2007. – 30с.
21. **Борщ-Компониц, В. И.** Практическая механика горных пород / В. И. Борщ-Компониц. – М.: Из-во «Горная Книга», 2013. – 322с.
22. **Дворкин, Л. И.** Испытания бетонов и растворов. Проектирование их составов / Л. И. Дворкин, В. И. Гонц, О. Л. Дворкин. – М.: Инфра – Инженерия, 2015. – 418 с.
23. **Гавриш, М. М.** Механіка гірських порід / Під заг. С. С. Греб'юнкін, М. М. Гавриша. – Донецьк: ДонНТУ, 2004. – 169 с.
24. **Бриджмен, П. В.** Анализ размерностей / П. В. Бриджмен. – Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2001. – 148 с.
25. **Обиралов, А. И.** Фотограмметрия / А. И. Обиралов, А. Н. Лимонов, Н. А. Гаврилова. – М.: Недра, 1969. – 392 с.
8. **Baruh, H.** Applied Dynamics, Taylor Francis Group, LLS, 2015, 872.
9. **Akimov, V.** Teoreticheskaya mekhanika, Dinamika, V 2ch, Chast' 2, Dinamika material'noy tochki [Theoretical mechanics, Dynamics, Part 2, Dynamics of the material point]. Ed. prof. A. V. Chigareva, Minsk: New knowledge, 2010, 863.
10. **Kilchevsky, N. A.** Teoriya soudareniy tverdykh tel [The theory of collisions of solids]. Kiev: Naukova Dumka, 1969, 246.
11. **Ginsberg, I.** Engineering Dynamics. Cambridge University Press, 2008, 726, doi: 10.1017/CBO9780511805899.
12. **Kleppner, D., Kolenkow, R.** An introduction to Mechanics. Cambridge University Press, 2014, 542.
13. **Strelkov, S.** Vvedeniye v teoriyu kolebaniy [Introduction to the theory of oscillations]. SPb.: Publishing house "Lan", 2005, 440.
14. **Gusev, A., Navoselova, M.** Prikladnaya teoriya kolebaniy [Applied theory of oscillations]. Tver State, Univ, 2017, 160.
15. **Ebrahimi, F.** Advances in Vibration Analisic Reserch. In Tech, 2011, 456, doi: 10.5772/639.
16. **Bottega, W. J.** Engineering Vibrations. CRC Press, Taylor&Francis Group, 2006, 727.
17. **Baddour, N.** Recent Advances in Vibration Analisic. In Tech, Rijeka, Croatia, 2011, 236.
18. **Kovaleva, N., Rutman, Yu., Davydova, G.** Opredeleniye optimal'nykh parametrov dempfirovaniya v sistemakh seysmoizolyatsii [Determination of optimum damping parameters in seismic insulation systems]. *Construction Engineering Journal, Magazine of Civil Engineering*, 2013, 5, 107-115.
19. **Vodopyanov, V., Belov, A.** Issledovaniye dempfiruyushchikh svoystv materialov [Investigation of damping properties of materials], Volgograd, VolgGTU, 2001, 12.
20. Natsional'nyy standart Ukrayiny, Metody vyprovuvannya tsementu, Chastyna 1, Vyznachennya mitsnosti [National standard of Ukraine, Methods of test of cement, Part 1, Determination of durability] (EN 196-1: 2005, IDT) DSTU EN196-1: 2007, Kiev, Minsk Ukraini, 2007, 30.
21. **Borscht-Komponiyets, V.** Prakticheskaya mekhanika gornyykh porod [Practical mechanics of rocks mountains]. M.: From-in "Mountain Book", 2013, 322.
22. **Dvorkin, L., Gotz, V., Dvorkin, O.** Ispytaniya betonov i rastvorov, Proyektirovaniye ikh sostavov [Concrete and solution tests, Designing their compositions]. M.: Infra-Engineering, 2015, 418.
23. **Havrish, M.** Mekhanika hirs'kykh pored [Mechanics of rocks ]. Pid zah. S. Hreb'onkina, M. Havrish. Donetsk: DonNTU, 2004, 169.
24. **Bridgman, P.** Analiz razmernostey [Dimension analysis], Izhevsk, Scientific and Research Center "Regular and Chaotic Dynamics", 2001, 148.
25. **Obiralov, A., Limonov, A., Gavrilova, N.** Fotogrammetriya [Photogrammetry]. M.: Nedra, 1969, 392.

## References (transliterated)

1. **Nikolin, V. I., Podkopaev, S. V., Agafonov, A. V., Maleev, N. V.** Snizhenie travmatizma ot pojavlenij gornogo davleniya [Injury Reduction of manifestations of rock pressure]. Donetsk: Nord-Press, 2005, 332.
2. **Zhukov, V., Vistorop, V., Kolchin, A. et al.** Malootkhodnaya tekhnologiya dobychi uglya [Low-waste coal mining technology]. K.: Technics, 1984, 144.
3. **Liashok, Ya., Iordanov, I., Chepiga, D., Podkopaiev, S.** Experimental studies of the seam openings competence in different methods of protection under pitch and steep coal seams development. *Mining of Mineral Deposits*, 2018, 12, 4, 9-19, doi: 10.1547/mining12.04.009.
4. **Zborshchik, M., Podkopaev, S.** Mekhanizm povysheniya ustoychivosti krovlі v lavakh pri primenenii zakladki vyrabotannogo [The mechanism of increasing the stability of the roof in the pits when using the laying of a goaf]. *Coal of Ukraine*, 1992, 5, 20-23.
5. **Shashenko, A. N., Pustovoitenko, V. P., Sdvizhikova, E. A.** Geomekhanika [Geomechanics]. K.: New druk, 2016, 528.
6. **Shakirzyanov, R., Shakirzyanov, F.** Dinamika i ustoychivost' sooruzheniy [Dynamics and stability of structures]. Kazan, Publishing House Kazans state arch-pp. University, 2005, 120.
7. **Ziegler, F.** Mekhanika tverdykh tel i zhidkostey [Mechanics of solids and liquids]. Izhevsk: SIC "Regular and chaotic mechanics", 2002, 912.

## Сведения об авторах (About the Authors)

**Подкопаев Сергей Викторович** – доктор технических наук, профессор кафедры «Охрана труда», Государственное высшее учебное заведение «Донецкий национальный технический университет», г. Покровск, Украина; ORCID: 0000-0002-3258-9601; e-mail: spodkopaiev@aol.com.

**Serhii Podkopaiev** – Doctor of Technical Sciences, Public higher education institution Donetsk National Technical University, Pokrovsk, Ukraine; ORCID: 0000-0002-3258-9601; e-mail: spodkopaiev@aol.com.

**Иорданов Игорь Вячеславович** – кандидат технических наук, соискатель кафедры «Охрана труда», Государственное высшее учебное заведение «Донецкий национальный технический университет», г. Покровск, Украина; ORCID: 0000-0001-9991-781X; e-mail: gendir@eme.kiev.ua.

**Igor Iordanov** – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Applicant, Public higher education institution Donetsk National Technical University, Pokrovsk, Ukraine; ORCID: 0000-0001-9991-781X; e-mail: gendir@eme.kiev.ua.

**Симонова Юлия Игоревна** - аспирант кафедры «Разработка месторождений полезных ископаемых», Государственное высшее учебное заведение «Донецкий национальный технический университет», г. Покровск, Украина; ORCID: 0000-0002-9192-7850; e-mail: yuliia.simonova@donntu.edu.ua.

**Yuliia Simonova** - graduate student, Public higher education institution Donetsk National Technical University, Pokrovsk, Ukraine; ORCID: 0000-0002-9192-7850; e-mail: yuliia.simonova@donntu.edu.ua.

**Положий Антон Витальевич** – аспирант кафедры «Разработка месторождений полезных ископаемых», Государственное высшее учебное заведение «Донецкий национальный технический университет», г. Покровск, Украина; e-mail: anpolozhii@gmail.ru.

**Anton Polozhiy** - graduate student, Public higher education institution Donetsk National Technical University, Pokrovsk, Ukraine; e-mail: anpolozhii@gmail.ru.

**Король Антон Вячеславович** – инженер, ПСП «Шахтоуправление «Добропольское» ООО «ДТЭК Добропольеуголь»», г. Доброполье, Украина; e-mail: akorolv2017@gmail.com.

**Anton Korol** – engineer, PSP "Dobropolskoe Mine Administration" DTEK Dobropolyeugol LLC ", Dobropolye, Ukraine; e-mail: akorolv2017@gmail.com.

**Бойченко Геннадий Эдуардович** – директор ООО «Шахта «Свято-Покровская №3», м. Покровськ, Украина; e-mail: ge.boychenko@gmail.com.

**Hennadii Boichenko** - Director of Svyato-Pokrovskaya Mine 3, LLC, Pokrovsk, Ukraine; e-mail: ge.boychenko@gmail.com.

*Пожалуйста, ссылайтесь на эту статью следующим образом:*

**Подкопаев, С. В.** Исследование на моделях устойчивости боковых пород при внезапных обрушениях расслоившейся толщи / **С. В. Подкопаев, И. В. Иорданов, Ю. И. Симонова, А. В. Положий, А. В. Король, Г. Э. Бойченко** // *Вестник НТУ «ХПИ», Серия: Новые решения в современных технологиях.* – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2019. – № 1. – С. 48-57. – doi:10.20998/2413-4295.2019.01.06.

*Please cite this article as:*

**Podkopaiev, S., Iordanov, I., Simonova, Y., Polozhiy, A., Korol, A., Boichenko, H.** Study on models of stability of side species at extreme damage of a divided thickness. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies.* – Kharkiv: NTU "KhPI", 2019, 1, 48–57, doi:10.20998/2413-4295.2019.01.06.

*Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:*

**Подкопаєв, С. В.** Дослідження на моделях стійкості бічних порід при раптових обваленнях розширеної товщі / **С. В. Подкопаєв, І. В. Іорданов, Ю. І. Сімонова, А. В. Положій, В. Ю. Довгаль, А. В. Король** // *Вісник НТУ «ХПІ», Серія: Нові рішення в сучасних технологіях.* – Харків: НТУ «ХПІ». – 2019. – № 1. – С. 48-57. – doi:10.20998/2413-4295.2019.01.06.

**АНОТАЦІЯ** Метою роботи є визначення умов стійкості бічних порід в вуглепородному масиві, що вміщує виробки, при підтримці покрівлі вугільного пласта піддатливої опори. Для досягнення поставленої мети були виконані дослідження з залученням основних положень класичної механіки, теорії пружності і коливань, а також лабораторні дослідження на моделях з еквівалентних матеріалів, коли покрівля вугільного пласта була представлена у вигляді балки з піддатливою опорою. В результаті відпрацювання експериментальних моделей, враховувалися геометричні параметри, що відображають в певні моменти часу, величину можливого відхилення центру мас балки від положення рівноваги  $a$ , (м) при ударі і миттєвого стиснення піддатливої опори  $\Delta X$ , (м). Доведено, що після силового впливу падаючої породи на балку, при певній жорсткості піддатливої опори, з урахуванням тривалості удару  $t_{\text{уд}}$ , (с) і проміжку часу, протягом якого переміщення балки досягає максимальних значень  $\Delta t$ , (с), тобто коли  $t_{\text{уд}} = \Delta t$ , (с) і  $a \approx \Delta X$ , (м), моделюєма система втрачає свою стійкість. При такій взаємодії балки з піддатливою опорою, у міру збільшення жорсткості охоронної споруди, коли  $a$ , (м) і  $\Delta X$ , (м), приймають мінімальні значення, ймовірність руйнування бічних порід і їх обвалення в виробці, збільшується. Виконаний комплекс досліджень показує, що при раптових обваленнях розширеної породної товщі, для зниження рівня травматизму гірників і підвищення стійкості покрівлі вугільного пласта в робочій частині лави і позаду очисного вибою, доцільно застосування піддатливих опор з роздробленої породи, обґрунтованого гранулометричного складу.

**Ключові слова:** гірничий тиск; обвалення; згинні коливання; динамічні навантаження; податлива опора; закладка виробленого простору

*Поступила (received) 23.08.2019*